

# 事故時高温条件での燃料健全性確保のための ODS フェライト鋼 燃料被覆管の研究開発(3) (8) $\alpha/\alpha'$ 相分離影響評価 (まとめ)

R&D of ODS Ferritic Steel Cladding for Maintaining Fuel Integrity at Accident Condition (3)

(8)  $\alpha/\alpha'$  phase separation effects (Evaluation summary)

\*木村晃彦<sup>1</sup>, 藪内聖皓<sup>1</sup>, 鳥丸忠彦<sup>2</sup>, 鶴飼重治<sup>3</sup>, 大野直子<sup>3</sup>, 皆藤威二<sup>4</sup>, 林 重成<sup>5</sup>

<sup>1</sup>京都大学, <sup>2</sup>NFD, <sup>3</sup>北海道大学, <sup>4</sup>JAEA, <sup>5</sup>東京工業大学

事故耐性燃料被覆管として開発されている FeCrAl-ODS フェライト鋼の熱時効硬化・脆化およびイオン照射影響を調べ、相分離の観点から適切な ODS 鋼の成分を検討した結果、Cr 量としては、12 wt%Cr ないし 15 wt%Cr が好ましく、Al 量については、7 wt%Al 程度あるいはそれ以下が好ましいと結論した。

**キーワード**：事故耐性燃料被覆管，酸化物分散強化 (ODS) 鋼，熱時効，475°C脆化，全伸び，均一伸び

## 1. 緒言

燃料被覆管の高温水や高温水蒸気中における耐食性および耐酸化性の向上は、事故時の被覆管と冷却水との反応速度を低下させ、水素発生を抑制するため、事故耐性燃料被覆管として期待されており、候補材として高 Cr-高 Al-ODS 鋼が提案されている。一方、高 Cr フェライト鋼では熱時効脆化が従来からの課題であると共に、高 Al 化による脆化も懸念されている。一方、一般に高 Cr 化は熱時効脆化が従来からの課題であると共に、高 Al 化による脆化も懸念されている。本研究では、成分の異なる高 Cr-高 Al-ODS 鋼の熱時効に伴う強度特性変化を調べ、 $\alpha/\alpha'$ 相分離挙動に及ぼす Al 添加効果を明らかにし、事故耐性燃料被覆管の合金設計のための指針を得ることを目的とする。

## 2. 実験方法

Cr および Al の濃度を変化させた 20 種類の ODS 鋼の受け入れ材および再結晶材に対し、硬さ試験、引張試験片および衝撃試験を熱時効処理前後に実施した。熱時効処理は、温度を 300°C、475°C および 700°C とし、試験片を真空 ( $1 \times 10^{-3}$  Pa) 封入し、最長 1 万時間まで実施した。ビッカース硬さ試験を室温、負荷荷重 200g で実施した。引張試験は室温で行い、ひずみ速度を  $6.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  とした。衝撃試験は、1.5CVN ( $1.15 \times 1.5 \times 20 \text{ mm}^3$ ) 試験片を用いて、落重型計装化衝撃試験機を用いて行った。

## 3. 結果

**3.1 Al 影響**：従前より、Fe-Cr 相分離が Al により抑制されることが示されていたが、その詳細な機構については不明であった。一方、本研究で用いた鋼材においては、高 Al 材においては、 $\text{Fe}_3\text{Al}$  の生成の可能性が高く、脆化に寄与していると考えられる。Al 量については、9 wt%Al は靱性を損ない、製管プロセスに支障をきたす恐れがあるため、7 wt%Al 程度あるいはそれ以下が好ましいと言える。一方、製管プロセスにおける加工速度や加工温度の制御に関する知見も得られており、室温引張試験では、高 Al 合金において顕著な脆化挙動は認められていないが、衝撃試験においては上部棚エネルギーの低下が観察されている。

**3.2 Cr 影響**：衝撃特性に及ぼす Fe/Cr 相分離の観点からは、Cr 量としては 12 wt%Cr ないし 15 wt%Cr が好ましいと考えられる。一方、ODS 鋼は引張伸びの低下はほとんど生じず、例えば、均一伸び 1% の確保は、18%Cr 鋼においてすら長時間保証できる見通しである。実際上の運用における時効脆化評価の指標として、均一伸びや DBTT が対象になると考えられるが、伸びの低下が小さな ODS 鋼では破壊靱性 (K 値や DBTT) 評価の意義づけが必要であり、今後の安全基準・規程をふくめ、検討していく必要がある。

本研究の一部は、文部科学省の原子力システム研究開発事業による委託業務として、国立大学法人北海道大学が実施した平成 25～28 年度「事故時高温条件での燃料健全性確保のための ODS フェライト鋼燃料被覆管の研究開発」の成果である。

\*Akihiko Kimura<sup>1</sup>, Kiyohiro Yabuuchi<sup>1</sup>, Tadahiko Torimaru<sup>2</sup>, Shigeharu Ukai<sup>3</sup>, Naoko Oono<sup>3</sup>, Takeji Kaito<sup>4</sup>, and Shigenari Hayashi<sup>5</sup>: <sup>1</sup>Kyoto Univ., <sup>2</sup>Nuclear Fuel Development, <sup>3</sup>Hokkaido Univ., <sup>4</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>5</sup>Tokyo Institute Technology